

УДК 621.3.01

А. В. Зубарев, А. В. Кондаков, А. Н. Шатунов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## **Использование компьютерного моделирования при подготовке к олимпиаде в рамках дисциплины «Теоретические основы электротехники»**

*Для выявления талантливой молодежи, развития у студентов интереса к выбранной профессии, оценки профессиональных знаний и навыков высшие учебные заведения проводят ежегодные олимпиады по различным профильным предметам. В данной статье представлен возможный вариант подготовки студентов к участию в таких олимпиадах на примере курса теоретических основ электротехники. Рассмотрены аналитические решения двух задач повышенной сложности по теории электрических цепей. Приведено подробное решение задачи при постоянном токе и задачи по расчету симметричной трехфазной цепи в установившемся синусоидальном режиме с двумя различными нагрузками. Показано применение специализированного программного обеспечения (ПО) для самостоятельного контроля студентами полученных результатов. В качестве программных продуктов рассматривается платная компьютерная программа NI Multisim 14.1 и программное обеспечение Qucs, распространяемое по свободной лицензии.*

### **Олимпиадные задачи, программное обеспечение, анализ электрических цепей, трехфазная цепь**

Целью проведения олимпиад по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) служат поиск талантливых студентов, стимулирование активности студентов и популяризация дисциплины. Именно там при решении нестандартных задач повышенной сложности студенты проявляют свой характер и целеустремленность, получают возможность раскрыть свой творческий потенциал. Победители и призеры олимпиад могут претендовать на повышенные стипендии, получают дополнительные баллы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, имеют приоритет при зачислении в кадровый резерв ведущих организаций и предприятий.

Для достижения высоких и стабильных результатов необходима подготовка. Обычно учебное заведение заранее формирует группы заинтересованных студентов и назначает им руководителя. Однако в силу различных причин могут оставаться студенты, желающие вести подготовку в рамках дисциплины самостоятельно. В этом случае они, решая примеры олимпиадных задач без преподавателя, не имеют возможности проверить результат, так как решения задач прошедших олимпиад нигде не публикуются. В результате интерес студентов к таким задачам падает.

Данную проблему можно решить, используя моделирование электрических цепей с помощью компьютерного ПО для проверки решения задач. Этот выход часто остается незамеченным, так как большинство студентов второго-третьего курсов – основной контингент участников олимпиад по ТОЭ – еще не знакомы со специализированным ПО.

Отметим, что главное отличие олимпиадных задач от обычных задач курса основ электротехники – это такая постановка задания, для решения которого не получится сразу подобрать стандартную методику. В стандартных задачах задаются известные воздействия источников и номиналы всех элементов цепи, а ищутся реакции. В олимпиадных задачах, как правило, наоборот, знаем какие-то реакции цепи (частично), а ищем номиналы воздействий или элементов. Студенту при решении таких задач приходится использовать нестандартные ходы, вследствие чего ему сложно быть уверенным в правильности своих ответов, если последних на руках нет.

Далее рассмотрим решение двух олимпиадных задач: на расчет резистивной цепи постоянного тока и трехфазной цепи в установившемся синусоидальном режиме при соединении прием-

ников звездой и треугольником. Покажем результаты моделирования в двух программных средах: NI Multisim и Qucs [1]–[2].

Резистивная цепь постоянного тока представлена на рис. 1, где  $U_0$  – напряжение источника напряжения (ИН);  $I_0$  – ток источника тока (ИТ);  $R$  – сопротивления резисторов;  $U$  – напряжение на поперечном резисторе. Известно, что в цепи при постоянных положительных воздействиях ( $U_0 = \text{const}$  и  $I_0 = \text{const}$ ) при увеличении значения напряжения источника напряжения  $U_0$  в два раза, напряжение  $U$  изменяется на 5 В, а мощность источника тока  $P_{I_0}$  – на 40 Вт.

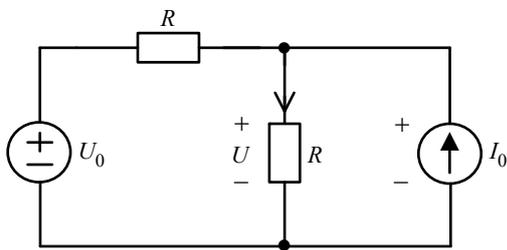


Рис. 1

Необходимо определить номиналы источников  $U_0$  и  $I_0$ , далее – промоделировать эту цепь в специализированной компьютерной программе и убедиться в корректности ручного расчета.

Далее приводится аналитическое решение поставленной задачи. Применив метод наложения [3], запишем формулу для расчета напряжения:

$$U = \frac{U_0}{2} + \frac{I_0 R}{2}, \quad (*)$$

где первое слагаемое – это вклад от ИН, второе слагаемое – вклад от ИТ.

Согласно условию задачи и с учетом (\*) получаем, что увеличение значения напряжения  $U_0$  в два раза приводит к увеличению значения напряжения  $U$  на 5 В. Преобразуем выражение (\*) следующим образом:

$$U + 5 = \frac{U_0}{2} \cdot 2 + \frac{I_0 R}{2} = \left( \frac{U_0}{2} + \frac{I_0 R}{2} \right) + \frac{U_0}{2},$$

откуда получаем, что  $U_0/2 = 5$ , значит,  $U_0 = 10$  В.

Мощность источника тока, учитывая его несогласованное подключение, вычисляется по формуле

$$P_{I_0} = (-1)UI_0.$$

При увеличении значения напряжения  $U$ , мощность источника тока с учетом знака уменьшится, следовательно:

$$P_{I_0} - 40 = (-1)(U + 5)I_0 = (-1)UI_0 - 5I_0,$$

тогда получаем, что  $5I_0 = 40$  и, значит,  $I_0 = 8$  А.

Проверим полученные результаты, промоделировав эту цепь в программе Qucs [4]. На рис. 2 приведена цепь, где в качестве номиналов источников подставлены найденные значения. Сопротивления резисторов выбираем произвольные, но соблюдая условие  $R_1 = R_2$ . Контролируем напряжение поперечного резистора  $R_2$  и мощность источника тока  $I_0$ .

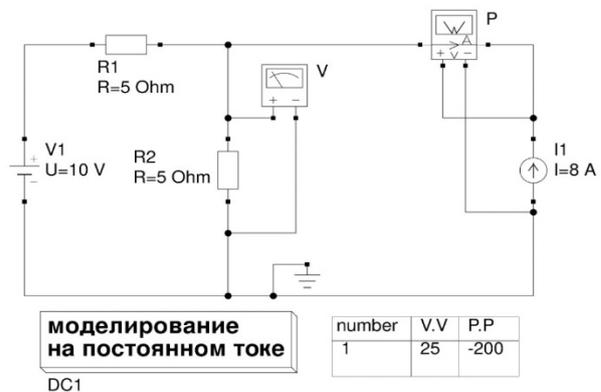


Рис. 2

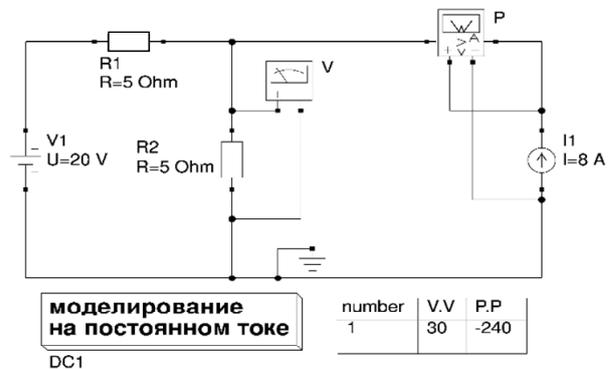


Рис. 3

Теперь увеличим значение напряжения ИН в два раза и убедимся, что напряжение поперечного резистора увеличится на 5 В, а мощность ИТ изменится на 40 Вт. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Анализ результатов моделирования показывает, что расчеты выполнены правильно. Следует понимать, что ход решения олимпиадных задач может быть различным, часто студенты находят более оригинальные и простые решения, нежели предлагает преподаватель.

Рассмотрим для примера более сложную задачу – по тематике трехфазных цепей, а для того чтобы проверить корректность ручного расчета, воспользуемся компьютерной программой NI Multisim [5].

На рис. 4 изображена схема симметричной трехфазной цепи, которая представляет собой совокупность трехфазного генератора напряжений, линии электропередач и двух нагрузок: активно-индуктивной, соединенной звездой ( $X_L$  – индуктивное сопротивление), и емкостной, соединенной треугольником ( $X_C$  – емкостное сопротивление).

Фазное напряжение трехфазного симметричного источника питания  $U_{\phi} = 220$  В. При этом показание амперметра  $I_A = 22$  А, показания ваттметров:  $P_{w1} = 0$  Вт;  $P_{w2} = 8383.1$  Вт. Линейная частота сети  $f = 50$  Гц.

Суть данной задачи состоит в том, чтобы найти ручным расчетом номиналы элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , далее смоделировать эту электрическую цепь в ПО Multisim для контроля правильности проведенных вычислений.

Далее приводится аналитическое решение поставленной задачи. Заметим, что у данной трехфазной цепи нагрузка симметричная, а ваттметры включены «особым» способом (токовая обмотка ваттметра включена на ток фазы «А», а обмотка напряжения включена на две «чужие» фазы «В» и «С»). В таком случае, зная показание ваттметра, можно численно получить значение реактивной мощности [6] согласно выражению

$$Q = \sqrt{3} \cdot P_w,$$

где  $P_w$  – показание ваттметра.

Тогда общая реактивная мощность всей цепи  $Q_{RLC} = \sqrt{3} \cdot P_{w1} = 0$  ВАр. Отсюда можно сделать вывод, что в  $RLC$ -цепи наблюдается резонанс. Реактивная мощность всего  $RL$ -участка  $Q_{RL} = \sqrt{3} \cdot P_{w2} = 14\,520$  ВАр. Из-за симметрии  $RL$ -нагрузки получим, что реактивная мощность одного  $L$ -элемента

$$Q_L = \frac{Q_{RL}}{3} = 4840 \text{ ВАр.}$$

Для дальнейшего расчета в схеме на рис. 4 выполним преобразование из «треугольника» в «звезду» для симметричного емкостного контура. На рис. 5 представлена новая расчетная схема, где емкостное сопротивление  $X'_C = \frac{X_C}{3}$ .

Поскольку трехфазная цепь – симметричная, то каждая из фаз работает в независимом режиме друг от друга. На рис. 6 представлена схема одной расчетной фазы «В», где  $U_{BO}$  – фазное напряжение источника.

Из-за того что в  $RLC$ -контуре на рис. 6 наблюдается резонанс, можно найти реактивную мощность конденсатора:

$$Q_{X'_C} = -Q_L = -4840 \text{ ВАр,}$$

далее запишем формулу расчета реактивной мощности конденсатора [3] и вычислим его емкостное сопротивление:

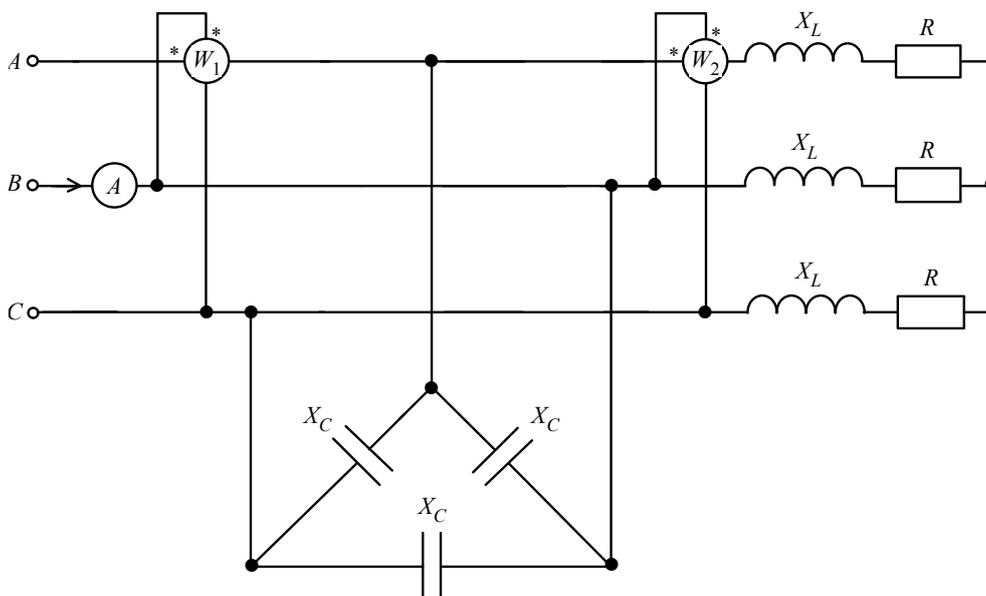


Рис. 4

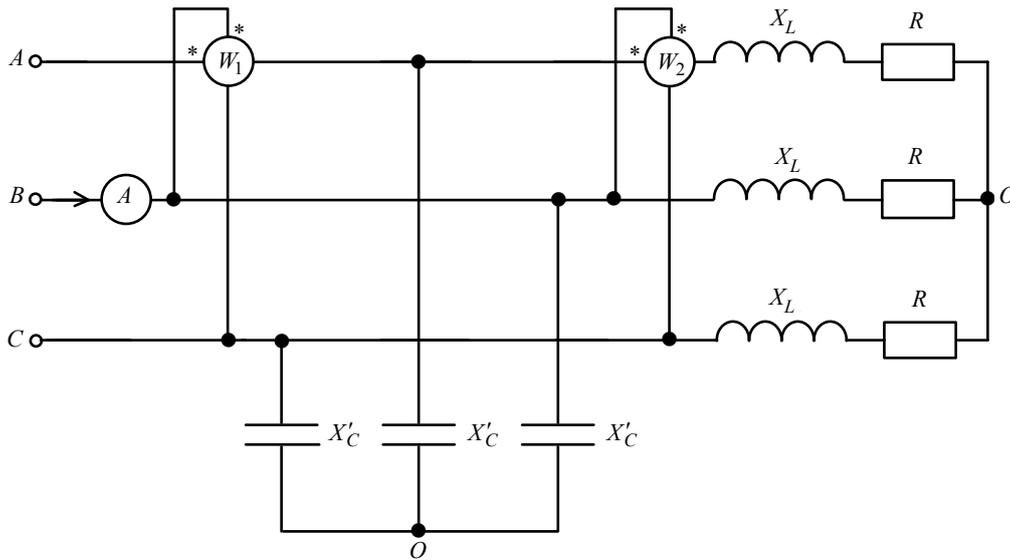


Рис. 5

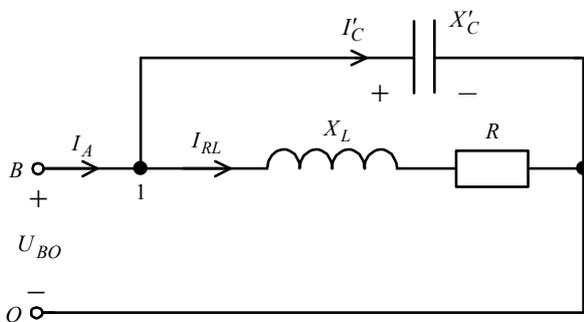


Рис. 6

$$Q_{X'_C} = -\frac{U_{X'_C}^2}{X'_C} = -\frac{U_{BO}^2}{X'_C} = -\frac{U_{\Phi}^2}{X'_C},$$

тогда  $X'_C = \frac{220^2}{4840} = 10$  Ом и, значит, сопротивление  $X_C = 3X'_C = 30$  Ом.

Рассчитаем номинальную емкость конденсатора:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 30} \approx 106.1 \text{ мкФ.}$$

Найдем действующее значение тока емкостного элемента  $I'_C$  (рис. 6), используя закон Ома:

$$I'_C = \frac{U_{BO}}{X'_C} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$

Запишем первый закон Кирхгофа в векторной форме для узла 1 цепи на рис. 6:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{RL} + \mathbf{I}'_C \text{ или } \mathbf{I}_{RL} = \mathbf{I}_A - \mathbf{I}'_C.$$

На рис. 7 представлена векторная диаграмма токов цепи, изображенной на рис. 6, из которой видно, что векторы токов  $\mathbf{I}_A$  и  $(-\mathbf{I}'_C)$  располагаются под углом  $90^\circ$ , тогда действующее значение тока через  $RL$ -участок можно вычислить по теореме Пифагора:

$$I_{RL} = I_R = I_L = \sqrt{(I_A)^2 + (I'_C)^2} = 22\sqrt{2} \text{ А.}$$

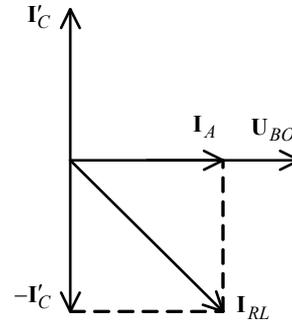


Рис. 7

Рассчитаем индуктивное сопротивление  $L$ -элемента, используя формулу для реактивной мощности [3]:

$$X_L = \frac{Q_L}{I_L^2} = \frac{4840}{968} = 5 \text{ Ом,}$$

и вычислим индуктивность  $L$ -элемента:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{5}{2\pi \cdot 50} \approx 15.9 \text{ мГн.}$$

Полную мощность  $S$  фазы «B» [3] можно вычислить по формуле

$$S = U_{\Phi} I_{\Phi} = U_{BO} I_A = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ ВА.}$$

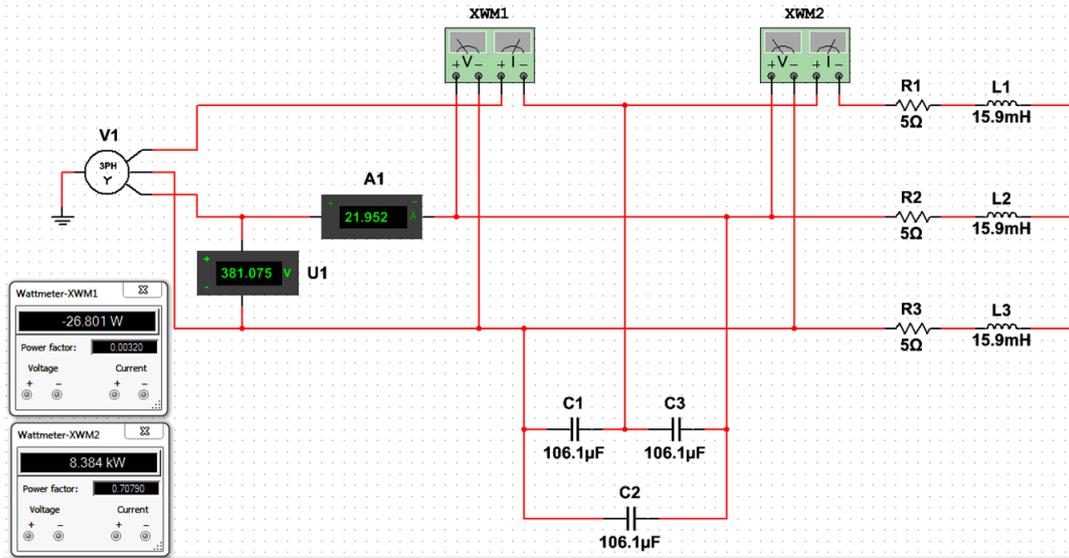


Рис. 8

Вследствие того, что цепь на рис. 6 находится в резонансе, полная мощность цепи численно равна активной мощности цепи и мощности  $R$ -элемента:

$$P_R = S = 4840 \text{ Вт.}$$

Можно рассчитать сопротивление  $R$ -элемента, используя формулу мощности

$$R = \frac{P_R}{I_R^2} = \frac{4840}{968} = 5 \text{ Ом.}$$

На рис. 8 представлена схема цепи, собранная в ПО Multisim. Проверим полученные результаты, промоделировав данную цепь.

На изображенной схеме цепи  $V1$  – трехфазный симметричный генератор питания, а измерительные приборы (мультиметры  $U1$  и  $A1$ ) измеряют, соответственно, действующее значение линейного напряжения сети ( $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi$ ) и линейный ток в цепи.

Включенные «особым» способом измерительные приборы (ваттметры  $XWM1$ ,  $XWM2$ ) служат для измерения реактивной мощности.

Задав рассчитанные ранее номинальные параметры для  $C$ -, и  $RL$ -нагрузок, запустим процесс моделирования и убедимся в корректности проведенного расчета по показаниям измерительных приборов.

Анализ результатов моделирования показывает, что расчеты выполнены корректно, но с долей погрешности.

Видно, что показания мультиметров  $U1$ ,  $A1$  и ваттметра  $XWM2$  с высокой точностью соответствуют тому, что было задано изначально по ТЗ. Правильность показания ваттметра  $XWM2$  также можно проконтролировать по значению его коэффициента мощности (Power factor = 0.7079) исходя из равенства сопротивлений  $R = X_L$ .

Показание ваттметра  $XWM1$  приближено к тому, что было задано по ТЗ, но отличается в силу невозможности получить строго нулевое значение коэффициента мощности (Power factor = 0.0032  $\approx$  0). Возникает это из-за погрешности округления при расчете и моделировании цепи в ПО, вследствие чего угол между напряжением и током оказывается чуть больше, чем  $90^\circ$ .

В статье рассмотрены примеры олимпиадных задач по ТОЭ с приведением возможных вариантов аналитического решения. Показаны способы проверки результатов с помощью компьютерного моделирования в программах NI Multisim 14.1 и Qucs. Акцентировано внимание на таких проблемах, как развитие олимпиадного движения и привлечение внимания студентов младших курсов к использованию компьютерного моделирования в своей образовательной деятельности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NI official site. URL: <https://www.ni.com> (дата обращения 12.09.21).
2. Quite Universal Circuit Simulator official site. URL: <http://qucs.sourceforge.net> (дата обращения 14.09.21).

3. Основы теоретической электротехники: учеб. пособие / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Белянин // СПб.: Лань, 2008.

4. Зубарев А. В., Шатунов А. Н. Моделирование электрических цепей в рамках дисциплины «Теоретические основы электротехники» в свободном программном продукте Qucs // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 55, Ч. 1. С. 39–45.

5. Зубарев А. В., Кондаков А. В., Шатунов А. Н. Компьютерное моделирование как инструмент обу-

чения в дистанционном формате на примере расчета трехфазной цепи // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 65, Ч. 2. С. 74–80.

6. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие. 7-е изд., стер. СПб.: Лань, 2009.

A. V. Zubarev, A. V. Kondakov, A. N. Shatunov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## COMPUTER MODELING APPLICATIONS IN THE PREPARATION PROCESS FOR OLYMPIAD ON «THEORETICAL FOUNDATIONS OF ELECTRICAL ENGINEERING»

*In order to spot talented young students, build up their interest in the chosen profession, to rate their professional knowledge and skills, universities organize annual specialized Olympiads. The present paper offers an algorithm of preparing students for such events using the course on basic electrotechnics as an example. In particular, analytical solutions of two high-level problems on electrical circuits theory are being discussed. Also, detailed solutions of problems on direct current and symmetric three-phase circuit in steady-state mode with two different loads are given. The cases of use the specialized software for students to control the obtained results is shown. The programs used are proprietary NI Multisim 14.1 and open-source Qucs.*

**Olympiad problems, software, electrical circuits analysis, three-phase circuit**

УДК 621.365.5

А. М. Любомиров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Стартовый нагрев оксидного материала для обеспечения технологий на базе индукционной плавки в холодном тигле

*Рассматриваются известные методы предварительного или стартового нагрева оксидов, которые обеспечивают дальнейший процесс индукционной плавки оксидов в холодном тигле. Любой метод стартового нагрева должен обеспечить некоторый минимальный объем оксидного расплава, который будет приемником энергии электромагнитного поля, создаваемого индуктором в котором расположен холодный тигель. В результате исследований автором определен диапазон допустимого изменения стартового объема оксидного расплава. При этом стартовый нагрев надежно обеспечивает организацию дальнейшего процесса индукционной плавки и минимизирует загрязнение оксикаридами стартовой зоны наплавляемого слитка. Сделан упор на экзотермический процесс организации стартового объема оксидного расплава. Исследование имеет хорошо обоснованную теоретическую часть, которая подтверждена экспериментальными результатами. Сформулированы практические рекомендации по организации экзотермического стартового процесса.*

**Оксиды, стартовый нагрев, дисперсный металл, стартовый объем расплава, шихта, оксидный расплав, холодный тигель, ванна расплава, индукционная плавка**

При обращении с оксидными материалами широко применяются петругические процессы, в которых технологические задачи обеспечивают-

ся при расплавлении оксида или смеси оксидов. До недавнего времени плавку оксидов осуществляли только в дуговых печах. Для борьбы с за-